

УДК 621.91

Е. В. Мироненко, д-р техн. наук, Г. П. Клименко, д-р техн. наук,
В. В. Калиниченко, канд. техн. наук, Краматорск, Украина

ОБЩАЯ СТРУКТУРА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

У статті викладені загальні наукові підходи до формування структури оптимізаційної математичної моделі для визначення енергоефективних технологічних параметрів обробки на важких токарних верстатах. Обґрунтовано використання мінімуму питомої енергомисткості різання у якості цільової функції моделі. Представлено загальний вигляд обмежень оптимізаційної моделі.

В статье изложены общие научные подходы к формированию структуры оптимизационной математической модели для определения энергоэффективных технологических параметров обработки на тяжелых токарных станках. Обосновано использование минимума удельной энергоемкости резания в качестве целевой функции модели. Представлен общий вид ограничений оптимизационной модели.

In the article the general scientific approaches near forming of structure of optimization mathematical model for determination of energy efficient technological parameters of heavy turning is expounded. The use of minimum of specific power consumption of cutting as the objective function of model is substantiated. The general view of constraints of optimization model is presented.

Постановка проблемы

Себестоимость и конкурентоспособность продукции современного машиностроения в значительной степени зависят от стоимости энергозатрат на механическую обработку деталей машин. По данным работы [1], удельная доля стоимости энергозатрат в общей себестоимости продукции машиностроения стран постсоветского пространства составляет от 15 до 25 % и характеризуется тенденцией неуклонного роста в связи с постоянным повышением цен на электроэнергию. В связи с этим, стратегическим направлением обеспечения высокой конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения является повышение энергоэффективности процессов механической обработки деталей. Особое значение проблема повышения энергоэффективности механической обработки деталей приобретает для высокоэнергоемкого тяжелого машиностроения.

Анализ исследований и публикаций по рассматриваемой проблеме

Рациональная эксплуатация станочного оборудования базируется на использовании оптимальных технологических параметров механической

обработки. При решении различных задач оптимизации процессов механической обработки в качестве критериев оптимизации могут использоваться различные по своей сущности критерии: как физические (например, интенсивность изнашивания инструмента), так и экономические (например, производительность, технологическая себестоимость обработки), а также обобщенные критерии, основанные на комплексной оценке различных аспектов процесса резания [2].

Очевидно, что при оптимизации высокоэнергоемких процессов механической обработки, к которым относится обработка деталей тяжелого машиностроения, логично применять критерии оптимизации, связанные с величиной энергозатрат на процесс резания. В частности, в работах В. К. Старкова [2], Ж. А. Мрочка и соавторов [3], А. В. Карпова [1, 4, 5] в качестве критериев оптимизации процесса механической обработки предлагается использовать количественные показатели удельной энергоемкости резания. Среди достоинств этих показателей, обуславливающих перспективность их применения в оптимизационных моделях процессов механической обработки, исследователи отмечают их четкий физический смысл, универсальность, простоту определения с помощью как теоретических, так и экспериментальных методов.

Обзор нерешенных частей проблемы

Несмотря на общеизвестный высокий уровень энергозатрат при обработке деталей тяжелого машиностроения, в оптимизационных моделях процессов обработки на тяжелых токарных станках энергетические критерии оптимизации нашли достаточно ограниченное применение [6]. Однако с ростом стоимости электроэнергии проблема повышения энергоэффективности механической обработки деталей становится все более актуальной и предполагает разработку математических моделей оптимизации процессов резания, основанных на использовании энергетических критериев оптимизации.

Цель статьи – на основании анализа системы факторов, влияющих на энергозатраты процесса резания, сформулировать общие научные подходы к формированию структуры оптимизационной математической модели для определения энергоэффективных технологических параметров обработки на тяжелых токарных станках.

Основная часть

Тяжелое машиностроение, являясь основой промышленного комплекса Украины, обеспечивает значительную часть внутреннего валового продукта государства и поступлений от экспорта. В структуре продукции предприятий отечественного тяжелого машиностроения значительную удельную долю занимают детали-тела вращения (валки прокатных станов, роторы

энергетических установок и др.). В качестве примера характеристик таких деталей в табл. 1 приведены характеристики валков прокатных станов производства ПАО НКМЗ (г. Краматорск). В структуре технологических процессов изготовления таких деталей преобладает токарная обработка, выполняемая на тяжелых токарных станках, причем около 70 % времени затрачивается на точение наружных цилиндрических поверхностей [6].

Таблица 1 – Характеристики валков прокатных станов производства ПАО НКМЗ (г. Краматорск) (по данным [7])

Габаритные размеры валков, мм	Масса валков, т	Материал валков	Твердость бочки и шеек	Точность валков	Шероховатость поверхности
1600×2700×6700 1500×2500×6300 1400×2000×5500 1200×1200×5000 1100×1500×4800	12–60	Сталь 50, 50ХН, 60ХН, 75Х2МФ, 75ХМФ, 90ХФ, 70Х3ГНМФ	Бочки и шеек до <i>HB</i> 320; бочки от <i>HSD</i> 60 до <i>HSD</i> 85; шеек от <i>HSD</i> 30 до <i>HSD</i> 55	Биение бочки и шеек от 0,02 мм до 0,005 мм	От R_a 3,2 мкм до R_a 0,4 мкм

Специфическими особенностями механической обработки деталей тяжелого машиностроения предопределяющими высокие энергозатраты на обработку, являются:

- большие значения мощности электродвигателя привода главного движения (ПГД) станка, обуславливающие высокий уровень абсолютных затрат (потерь) энергии при заданном значении удельных затрат (потерь);
- большие припуски на обработку деталей, обуславливающие высокие силовые нагрузки в зоне резания;
- большие потери электроэнергии при работе электродвигателя ПГД станка на холостом ходу во время смены режущей пластины (резцового блока) вследствие произошедшего отказа.

На основании анализа публикаций по теме исследования были систематизированы направления повышения энергоэффективности процессов механической обработки деталей на тяжелых токарных станках (рис. 1):

- 1) снижение затрат энергии на протекание физических процессов в зоне резания;
- 2) снижение потерь энергии в механической части (трансмиссии) ПГД станка;
- 3) снижение потерь энергии в электрической части ПГД станка.

Наиболее перспективным и реализуемым направлением повышения энергоэффективности механообработки деталей на тяжелых токарных

станках является снижение затрат энергии на протекание физических процессов в зоне резания, поскольку оно может быть обеспечено за счет оптимизации технологических параметров обработки и не требует обязательной модернизации ПГД используемых станков.



Рисунок 1 – Направления повышения энергоэффективности процессов механической обработки деталей на тяжелых токарных станках

Общая структура математической модели для определения оптимальных технологических параметров энергоэффективных процессов механической обработки деталей тяжелого машиностроения предполагает решение оптимизационной задачи вида [2]:

$$Q = \text{extr} \{f(x, \omega) | x \in D\}$$

с системой ограничений вида:

$$g(x, \omega) \leq 0;$$

$$f(x) \leq 0;$$

$$a_i \leq x_i \leq b_i,$$

где $f(x, \omega)$ – целевая функция (критерий оптимизации);

x – управляемые (варьируемые) параметры обработки;

ω – постоянные параметры обработки;

D – область допустимых значений управляемых параметров x ;

$a_i = \text{const}$, $b_i = \text{const}$.

Проблема формирования математических моделей оптимизации обработки деталей на тяжелых токарных станках с учетом энергозатрат при резании рассматривалась в работе [8]. В представленной в работе задаче многокритериальной оптимизации токарной обработки в качестве одного из критериев оптимальности рассматривалась мощность резания как показатель уровня энергозатрат при обработке. Решение задачи снижения энергозатрат процесса резания при обеспечении заданного объема обработки в течение заданного времени потребовало включения в оптимизационную модель в качестве другого критерия оптимальности штучного времени обработки детали – величины, обратной производительности труда. Вместе с тем, проведенный авторами анализ публикаций по теме исследования [1, 2] показал, что уровень энергозатрат в зоне резания, расходуемых на сьем заданного объема материала срезаемого слоя заготовки, наилучшим образом отражается удельной энергоемкостью резания:

$$e = \frac{A_{рез}}{V} = \frac{N_{эф}}{П_{рез}} = \frac{N_{рез}}{vSt},$$

где $A_{рез}$ – работа резания;

V – объем срезаемого слоя материала, превращаемого в стружку;

$N_{эф}$ – эффективная мощность резания;

$П_{рез}$ – производительность резания (съем стружки в единицу времени);

v – скорость резания;

S – подача резца;

t – глубина резания.

Удельная энергоемкость резания e является универсальной характеристикой энергетической эффективности съема материала при резании, не зависящей от экономических показателей производства. Это предполагает целесообразность применения показателя удельной энергоемкости резания при оптимизации отличающихся съемом

значительных припусков процессов обработки на тяжелых токарных станках. Целевая функция оптимизации процесса механической обработки при поиске наиболее энергоэффективных параметров съема припуска примет общий вид:

$$e = \min\{f(x, \omega) | x \in D\}.$$

На основании опыта оптимизации процессов обработки деталей на тяжелых токарных станках в качестве управляемых параметров x_i оптимизационной модели имеет смысл принять скорость резания v (либо частоту вращения шпинделя n для станков со ступенчатым регулированием ПГД) и подачу резца S . Глубину резания t , назначаемую технологом, равно как и свойства обрабатываемого и инструментального материала, принимаем в качестве постоянных параметров ω_i оптимизируемого перехода обработки.

$$\text{Логика известных закономерностей} \quad N_{\text{эф}} = \frac{P_z \cdot v}{60 \cdot 1020}$$

и $P_z = 10 \cdot C_{P_z} \cdot t^{x_{P_z}} \cdot S^{y_{P_z}} \cdot v^{n_{P_z}} \cdot K_{P_z}$ (P_z – тангенциальная составляющая силы резания; C_{P_z} – коэффициент; x_{P_z} , y_{P_z} , n_{P_z} – показатели степени, K_{P_z} – поправочный коэффициент на фактические условия резания) обуславливает степенной характер зависимости $e = f(S, v)$. Целевая функция минимума удельной энергоемкости резания, выраженная через управляемые параметры модели, может быть представлена как

$$e = f(S, v) = \frac{C_{P_z} \cdot t^{x_{P_z}-1} \cdot S^{y_{P_z}-1} \cdot v^{n_{P_z}} \cdot K_{P_z}}{6120} \rightarrow \min,$$

где для заданного перехода обработки $C_{P_z} = \text{const}$, $K_{P_z} = \text{const}$, $t = \text{const}$.

Поиск экстремума целевой функции $e = f(S, v) \rightarrow \min$ выполняется в области D допустимых значений управляемых параметров (S, v) модели, задаваемой системой ограничений по лимитирующим характеристикам обработки. Общий вид ограничений представлен в табл. 2. Перенеся в правую часть каждого из неравенств составляющие W , зависимые лишь от постоянных параметров обработки, получим общий вид ограничений как зависимостей управляемых параметров (S, v) модели, конкретизируемый в дальнейшем с помощью расчетно-теоретических формул и эмпирических зависимостей.

Таблица 2 – Общий вид ограничений модели оптимизации процесса продольного точения на тяжелых токарных станках

Лимитирующая характеристика	Общий вид ограничения	Общий вид ограничения как зависимости от управляемых параметров (S, v)
Мощность резания	$N_{\text{эф}} \leq N_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{см}}$	$S^{y_{P_z}} \cdot v^{z_{P_z} + 1} \leq W_M$
Режущая способность резца	$T \geq T_n$	$S^{y_v} \cdot v \leq W_{p.c}$
Прочность державки резца	$P_z \leq [P_z]_{n.p}$	$S^{y_{P_z}} \cdot v^{z_{P_z}} \leq W_{n.p}$
Прочность режущей пластины	$P_z \leq [P_z]_{n.n}$	$S^{y_{P_z}} \cdot v^{z_{P_z}} \leq W_{n.n}$
Жесткость обрабатываемой детали	$P_y \leq [P_y]_{\text{ж.д}}$	$S^{y_{P_y}} \cdot v^{z_{P_y}} \leq W_{\text{ж.д}}$
Жесткость резца	$P_z \leq [P_z]_{\text{ж.р}}$	$S^{y_{P_z}} \cdot v^{z_{P_z}} \leq W_{\text{ж.р}}$
Шероховатость обработанной поверхности	$R_a \leq R_{a\text{мп}}$	$S \leq W_{\text{ш}}$
Прочность механизма подачи станка	$P_x \leq P_{\text{см}}$	$S^{y_{P_x}} \cdot v^{z_{P_x}} \leq W_{\text{нод}}$
Производительность обработки	$\Pi \geq \Pi_{\text{мп}}$	$S \cdot v \geq W_n$
Время работы двигателя ПГД станка на холостом ходу	$T_{x.x} \leq T_{x.x\text{мп}}$	$S^{y_v} \cdot v^{n_v} \leq W_{x.x}$
Кинематические характеристики станка	$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$ $S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$	

Пояснения к таблице: 1. $N_{\text{дв}}$ и $\eta_{\text{см}}$ – мощность двигателя ПГД станка и КПД привода; T и T_n – период стойкости резца и его нормативное значение; $[P_z]_{n.p}$, $[P_z]_{n.n}$, $[P_z]_{\text{ж.р}}$ – значения P_z , допускаемые прочностью державки резца, прочностью режущей пластины, жесткостью резца; P_y и $[P_y]_{\text{ж.д}}$ – радиальная составляющая силы резания и ее значение, допускаемое жесткостью детали; P_x и $P_{\text{см}}$ – осевая составляющая силы резания и наибольшая сила, допускаемая прочностью механизма подачи станка; R_a и $R_{a\text{мп}}$ – фактическая и требуемая чертежом шероховатость обработанной поверхности; Π и $\Pi_{\text{мп}}$ – фактическая и требуемая производительность обработки; $T_{x.x}$ и $T_{x.x\text{мп}}$ – фактическое и требуемое время работы двигателя ПГД станка на холостом ходу.

2 Составляющие W в ограничениях: W_M – в ограничении по мощности резания; $W_{p.c}$ – по режущей способности резца; $W_{n.p}$ – по прочности державки резца; $W_{n.n}$ – по прочности режущей пластины; $W_{\text{ж.д}}$ – по жесткости обрабатываемой детали; $W_{\text{ж.р}}$ – по жесткости резца; $W_{\text{ш}}$ – по шероховатости обработанной поверхности; $W_{\text{нод}}$ – по прочности механизма подачи станка; W_n – по производительности обработки; $W_{x.x}$ – по времени работы двигателя ПГД станка на холостом ходу

Помимо широко применяемых в практике оптимизации процессов токарной обработки ограничений, авторы статьи предлагают использовать ограничение по времени работы электродвигателя ПГД станка на холостом ходу. При замене режущей пластины (резцового блока) вследствие отказа двигатель ПГД станка работает на холостом ходу, потребляя электроэнергию из сети. Время работы двигателя на холостом ходу $T_{х.х}$ можно выразить как

$$T_{х.х} = f(\bar{T}, T_g),$$

где \bar{T} – средний период стойкости резца;

T_g – среднее время восстановления резца.

С учетом известного степенного характера зависимости $\bar{T} = f(S, v)$ ограничение по времени работы электродвигателя ПГД станка на холостом ходу представим как $S^{y_v} \cdot v^{n_v} \leq W_{х.х}$.

Учитывая степенной характер целевой функции и большинства ограничений, оптимальные технологические параметры обработки будут определяться с применением аппарата нелинейной оптимизации. Удельная энергоемкость резания может применяться как в качестве единственного критерия в однокритериальной оптимизации, так и совместно с другими критериями экономического характера (такими, как критерии себестоимости обработки C , расхода твердого сплава R_c и др.) в многокритериальной оптимизации.

Выводы

В статье изложены общие научные подходы к формированию структуры оптимизационной математической модели для определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения. В качестве целевой функции модели предложена функция минимума удельной энергоемкости резания. Представлен общий вид ограничений модели, в том числе ограничения по времени работы двигателя привода главного движения станка на холостом ходу. Модели, сформированные на основе представленных подходов, могут использоваться в расчетах энергоэффективных технологических параметров обработки и при разработке принципов адаптивного управления станками.

Список використаних джерел: 1. Карпов, А. В. Об оценке энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием / А. В. Карпов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 2. – С. 61–68. 2. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с. – ISBN 978-5-94275-460-0. 3. Мрочек, Ж. А. Оптимизация параметров формообразования поверхностей резанием по энергопотребляющим показателям технологического оборудования / Ж. А. Мрочек, В. М. Адаменко, Д. В. Адаменко // Вестник Брестского государственного

технического университета. – 2007. – С. 54–57. 4. Карпов, А. В. Оптимизация процессов обработки резанием на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения материалов / А. В. Карпов // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. – 2012. – № 1. – С. 58–63. 5. Карпов, А. В. К вопросу определения обрабатываемости резанием конструкционных сталей / А. В. Карпов // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. – 2012. – № 4. – С. 50–54. 6. Мironenko, Е. В. Научные основы создания систем агрегатно-модульных инструментов для тяжелых токарных станков : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01. / Е. В. Мironenko ; Донбасская гос. машиностроительная академия. – Краматорск, 2003. – 417 с. 7. Васильченко, Я. В. Разработка технологических систем для обработки крупногабаритных деталей на базе адаптивных многоцелевых тяжелых станков / Я. В. Васильченко, Т. А. Сукова, М. В. Шаповалов // *Вісник СевНТУ. Зб. наук. пр. Серія : Машиноприладобудування та транспорт*. Севастополь : СевНТУ. – 2013. – Вип. 139. – С. 28–32. 8. Мironenko, Е. В. Оптимизация режимов резания при обработке на тяжелых токарных станках с учетом энергозатрат / Е. В. Мironenko, В. С. Гузенко, Л. В. Васильева, О. Е. Мironenko // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Технології в машинобудуванні. Харків : НТУ «ХПІ». – 2010. – № 40. – С. 62–70.

Bibliography (transliterated): 1. Karpov, A. V. Ob ocenke jenergeticheskoy jeffektivnosti tehnologicheskikh processov obrabotki rezaniem / A. V. Karpov // *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*. – 2014. – № 2. – S. 61–68. 2. Starkov, V. K. Fizika i optimizacija rezanija materialov / V. K. Starkov. – M. : Mashinostroenie, 2009. – 640 s. – ISBN 978-5-94275-460-0. 3. Mrochek, Zh. A. Optimizacija parametrov formoobrazovanija poverhnostej rezaniem po jenergotrebljajushhim pokazateljam tehnologicheskogo oborudovanija / Zh. A. Mrochek, V. M. Adamenko, D. V. Adamenko // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. – 2007. – S. 54–57. 4. Karpov, A. V. Optimizacija processov obrabotki rezaniem na osnove jenergeticheskikh zakonov deformatsii i razrushenija materialov / A. V. Karpov // *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*. – 2012. – № 1. – S. 58–63. 5. Karpov, A. V. K voprosu opredelenija obrabatyvaemosti rezaniem konstrukcionnyh stalej / A. V. Karpov // *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*. – 2012. – № 4. – S. 50–54. 6. Mironenko, E. V. Nauchnye osnovy sozdaniya sistem agregatno-modul'nyh instrumentov dlja tjazhelyh tokarnykh stankov : dis. ... d-ra tehn. nauk : 05.03.01. / E. V. Mironenko ; Donbasskaja gos. mashinostroitel'naja akademija. – Kramatorsk, 2003. – 417 s. 7. Vasil'chenko, Ja. V. Razrabotka tehnologicheskikh sistem dlja obrabotki krupnogabaritnyh detalej na baze adaptivnyh mnogocelevykh tjazhelyh stankov / Ja. V. Vasil'chenko, T. A. Sukova, M. V. Shapovalov // *Visnik SevNTU. Zb. nauk. pr. Serija : Mashinopriladobuduvannja ta transport*. Sevastopol' : SevNTU. – 2013. – Vip. 139. – S. 28–32. 8. Mironenko, E. V. Optimizacija rezhimov rezanija pri obrabotke na tjazhelyh tokarnykh stankah s uchetom jenergozatrata / E. V. Mironenko, V. S. Guzenko, L. V. Vasil'eva, O. E. Mironenko // *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkiv'skij politehničnij institut»*. Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk : *Tehnologii v mashinobuduvanni*. Harkiv : NTU «HPІ». – 2010. – № 40. – S. 62–70.

Поступила в редколлегию 30.06. 2015 г.